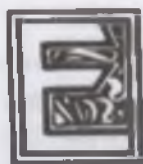


# Cómo se produce la energía que nos llega del sol?

Por: Juan Manuel Perea Espitia\*



Esta es una de las preguntas sobre el comportamiento de la naturaleza que durante varios siglos cautivó la mente de los científicos. Veamos por qué y cuál es la respuesta que hoy aceptan los científicos.

La tierra se desplaza alrededor del sol a una velocidad de 30 kilómetros por segundo. Su órbita forma, de modo muy aproximado, un círculo con un diámetro de 300 millones de kilómetros y mientras se mueve recibe luz del sol. La energía que recibe la cara dirigida hacia el sol, la cara que está de día, es remitida casi en su totalidad de nuevo al espacio, especialmente después de que la parte calentada haya girado por efecto de la rotación terrestre y se encuentre en la cara opuesta al sol, la cara nocturna. Debemos a esta alternancia entre energía recibida y energía emitida el que la superficie terrestre se mantenga a una temperatura que la hace habitable. Cada kilómetro cuadrado de la superficie terrestre dirigida hacia el sol recibe una irradiación de 1,36 kilovatios. La radiación total recogida por la superficie terrestre equivale a casi 200 billones de kilovatios. Pero por grande que pueda parecernos esta cantidad, es ínfima en comparación con la energía que el sol emite cada segundo en todas direcciones.

Pero, de dónde procede la energía que el sol emite desde hace tanto tiempo y con tanta intensidad? Puede explicarse mediante transformaciones o reacciones de tipo químico? Se ha considerado el proceso químico más sencillo capaz de proporcionar energía: la combustión. Los cálculos muestran que si el sol estuviera compuesto de carbón, la energía procedente

\* Profesor de Física. Programa de Matemáticas y Física. Universidad Surcolombiana.

de su combustión bastaría únicamente para cubrir la energía emitida durante unos 5.000 años. Sin embargo el sol brilla desde hace varios miles de millones de años. Los restos de la antigua vida orgánica descubiertos en estratos muy antiguos de la corteza terrestre demuestran que el sol brilla desde hace tiempo con la misma intensidad que ahora, o sea, con la intensidad suficiente para que la vida pueda mantenerse en la tierra. En los estratos de Onverwacht, en Transvaal, Suráfrica, se encuentran rastros de organismos unicelulares de desarrollo relativamente elevado y organizado, cuya estructura es ya tan complicada como la de nuestras actuales algas azules. Estos son los testimonios más primitivos de la vida en la tierra, unos testimonios de hace 3.500 millones de años. En aquella época el sol debió tener ya la misma luminosidad que tiene ahora. Otras dos hipótesis se consideraron acerca del origen de la energía solar.

Una de ellas sostenía que la energía se generaba por la caída de meteoritos sobre el sol lo que implica un aumento de su masa alterando el movimiento de la tierra alrededor del mismo. Esta hipótesis fue desechada porque los datos que se tienen de los eclipses solares y lunares de la antigüedad permite asegurar que no se ha producido ningún cambio medible en los movimientos de nuestro sistema planetario. La otra hipótesis sugiere que la fuente de la energía solar es su propia gravedad, es decir, que en el curso del tiempo se iría contrayendo y su diámetro se reduciría. En otras palabras, la materia solar "caería" sobre si misma. Pero este proceso alcanzaria a alimentar el brillo del sol durante sólo diez millones de años, una centésima parte de los miles de millones de años durante los cuales el sol ha estado brillando. Por lo tanto, tampoco la gravitación propia puede cubrir las necesidades energéticas del sol.

Sabemos actualmente que la energía nuclear es la fuente de energía más productiva que conocemos. La Fusión Nuclear es el proceso físico por el cual se combinan dos o más núcleos de valores muy pequeños de  $A$  (número másico), para formar un núcleo mayor, que tiene una energía promedio de amarre más elevada por nucleón y por lo tanto más estable. El sol, como casi todas las estrellas, está compuesto principalmente de hidrógeno. Tendrá sentido plantearse la posibilidad de que el sol se alimente de energía mediante la fusión del hidrógeno? Para responder a la pregunta debemos comprender en qué circunstancias tiene lugar la fusión del hidrógeno.

El sol mantiene su consistencia gracias a la gravedad de la masa que contiene su cuerpo. La gravedad atrae la materia hacia el centro. Pero la materia solar no llega a precipitarse hacia el punto central del astro porque



el gas solar ejerce una contrapresión. Esta presión tiende a impulsar la materia hacia afuera, es decir, que actúa en contra de la gravedad. Ambas fuerzas están en equilibrio. Conocida la gravedad con que la materia solar se atrae así misma podemos conocer la fuerza ejercida por la presión gaseosa para equilibrar esta gravedad. Esta fuerza de presión de un gas es función de su densidad y de su temperatura. Conocemos la densidad de la materia solar, porque sabemos el valor de la masa del sol y el volumen que ocupa. Entonces, qué temperatura ha de tener un gas en el interior del sol para que pueda equilibrar su gravedad?

Sir Arthur Eddington calculó, en los años veinte, que la temperatura del centro de las estrellas (el sol es una estrella) era de unos 40 millones de grados. Pero los físicos nucleares la consideraron demasiado baja para que pudiera tener lugar con ella reacciones nucleares. A esta temperatura los átomos del interior del sol se mueven con velocidades de 1.000 kilómetros por segundo. Los átomos de hidrógeno en estas condiciones han perdido sus electrones, y sus protones se desplazan libres por el espacio. En ocasiones choca un protón con otro, pero ambos están cargados positivamente y se repelen de nuevo. Cuando las velocidades son de 1.000 kilómetros por segundo, los protones pasan muy cerca unos de otros, pero las fuerzas eléctricas de repulsión los desvían antes de que puedan aproximarse lo suficiente para fusionarse. Además, para formar un núcleo de helio a partir de átomos de hidrógeno han de coincidir simultáneamente en un mismo punto cuatro protones y dos electrones, o sea, en total seis partículas, y este suceso es muy improbable, y aunque los seis coincidieran casualmente, las fuerzas eléctricas desviarían sus trayectorias impidiendo la fusión. Sólo si las partículas alcanzaran una temperatura de varias decenas de miles de millones de grados poseerían suficiente impulso para acabar fusionándose a pesar de las fuerzas eléctricas de repulsión. Los físicos consideraban, pues, que el sol, con su interior de 40 millones de grados, era demasiado frío para transformar el hidrógeno en helio.

Aproximadamente en la misma época en que Eddington escribía insistiendo en que el hidrógeno se transformaba en helio en el interior de las estrellas, el físico George Gamow resolvió el problema de la desintegración espontánea del átomo. Por ejemplo, un átomo de radio, al cabo de un tiempo determinado, expulsa por sí solo dos neutrones y dos protones transformándose en un núcleo de masa menor. Por su parte las partículas expulsadas se mantienen unidas y forman un núcleo de helio. Era difícil entender que el núcleo del radio pudiera expulsar un núcleo de helio. Los componentes del núcleo del radio están confinados y apretados en un

espacio reducido y se mantienen unidos por la acción de fuerzas muy potentes, las Fuerzas Nucleares. Estas fuerzas son mucho más intensas que la repulsión eléctrica de los protones. Si estas fuerzas nucleares no existieran, el núcleo del radio estallaría proyectando en todas direcciones los protones componentes. Las fuerzas nucleares, sin embargo, tienen un alcance reducido. Si una parte del núcleo se aleja demasiado del resto, predomina la repulsión eléctrica y ambas partes se separan. Pero esto según la física clásica no debería suceder, porque las fuerzas nucleares mantienen la cohesión del núcleo. A pesar de todo, esto es lo que sucede en la naturaleza.

Es cierto que los componentes de un núcleo de radio están unidos entre sí por las fuerzas nucleares y que en realidad no pueden separarse unos de otros. Sin embargo, la mecánica cuántica enseña que esto sólo puede cumplirse con una probabilidad determinada. Aunque el proceso sea imposible, según la mecánica clásica, una parte del núcleo, a pesar de las intensas fuerzas de ligazón, puede alejarse lo suficiente del resto para que la repulsión eléctrica supere las otras fuerzas y separe todavía más los dos productos de Fisión. Este fenómeno se denomina "efecto túnel", y sólo se ha podido comprender gracias a la mecánica cuántica. Es decir, esa parte del núcleo que se separa atraviesa la "barrera de potencial eléctrico" que mantiene cohesionado al núcleo. Pero, si algunas partículas pueden atravesar la barrera de potencial de dentro afuera, también otras partículas, según Gamow, pueden entrar en el núcleo atómico atravesando la barrera. La pregunta ahora sería ¿no podrán también los protones del sol fusionarse, aunque en realidad no debieran?

Los físicos Robert Atkinson y Fritz Houtermans en su trabajo publicado en marzo de 1929, aplicando el efecto túnel de Gamow, explicaron que los núcleos de hidrógeno podrían acercarse lo suficiente para fusionarse a las temperaturas relativamente bajas del interior de las estrellas, a pesar de que la física clásica exigía para el proceso temperaturas de decenas de miles de millones de grados. Un protón en una estrella está separado de los demás protones por un campo eléctrico (una barrera de potencial eléctrico), y sin embargo consigue, al cabo de mucho tiempo, superar esta barrera, aunque su energía sea insuficiente, el protón consigue atravesar la barrera gracias al efecto túnel. La probabilidad desde luego no es muy grande, pero el efecto actúa ciertamente en el interior del sol y en el interior de otras estrellas con la frecuencia suficiente para que la estrella pueda vivir de la energía que libera el proceso. El trabajo de estos físicos sentó las bases de la teoría de las reacciones termonucleares, teoría que explica la creación de energía en las estrellas.



Desde entonces sabemos que en las estrellas pueden tener lugar reacciones nucleares. Pero qué tipo de reacciones nucleares? Se fusionan protones con protones o penetran los protones en otros núcleos atómicos? Y en este último caso, en qué núcleos penetran?

Hans Brethe en Estados Unidos y Carl Friedrich Von Weizsacher en Alemania descubrieron en 1938, independientemente, la primera reacción que convierte el hidrógeno en helio y que puede proporcionar a las estrellas la energía que consumen. Ambos descubrieron el ciclo del carbono.

El proceso en este ciclo, presupone que en las estrellas además de hidrógeno hay otros elementos, por ejemplo carbono. Los núcleos de carbono juegan el papel de catalizadores, como en la química. El hidrógeno se une con estos núcleos y forma en su interior átomos de helio. Luego los núcleos de carbono, sin haber sufrido ninguna alteración neta, expulsan los átomos de hidrógeno convertidos, gracias a la fusión, en átomos de helio. Este proceso ciclico se ilustra en la figura 1.

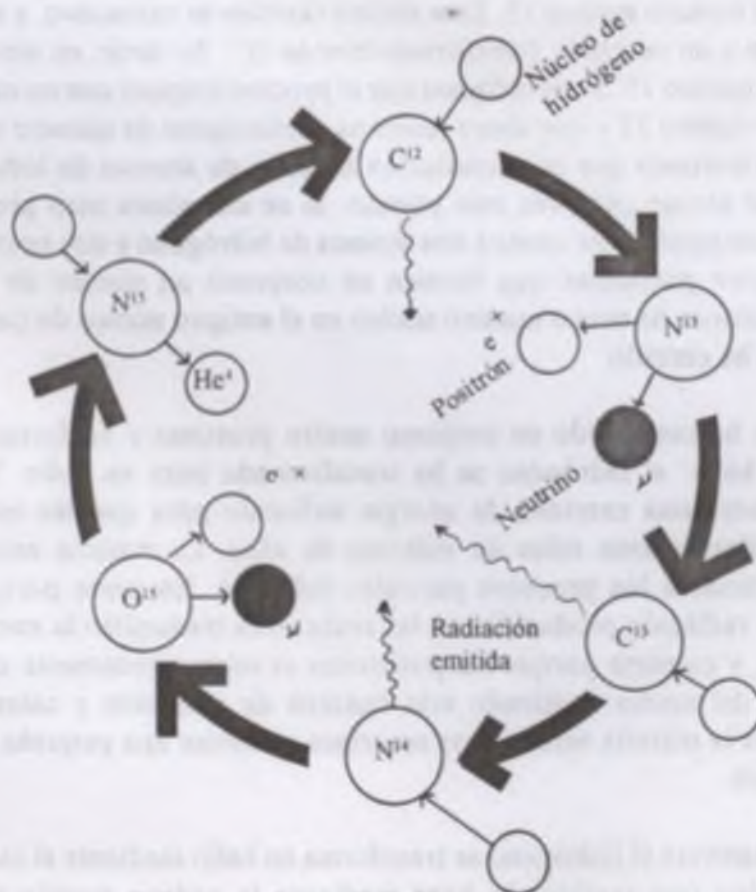


FIGURA 1

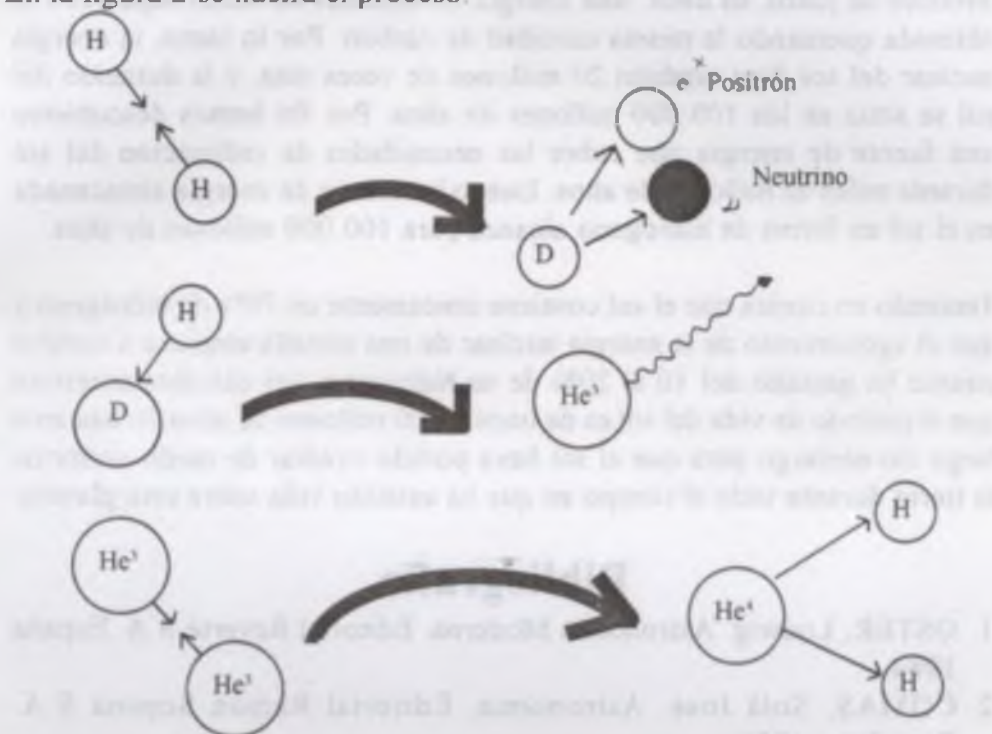
En la figura 1, el proceso inicia en la parte superior con el choque de un núcleo de hidrógeno con un núcleo de carbono de peso atómico 12, que designamos por  $C^{12}$ . Gracias al efecto túnel, el núcleo de hidrógeno puede superar el campo eléctrico repulsivo del carbono y fusionarse con su núcleo. El nuevo núcleo está compuesto por 13 partículas pesadas. La carga del núcleo original de carbono, o sea, su número atómico, ha aumentado debido a la carga positiva del protón añadido. Tenemos ahora un núcleo del elemento nitrógeno, de número másico 13. Lo designamos por  $N^{13}$ .

Este tipo de nitrógeno es radioactivo y al cabo de un tiempo expulsa dos partículas ligeras: un positrón y un neutrino. El nitrógeno se transforma ahora en carbono de número másico 13, o sea  $C^{13}$ . El núcleo vuelve a tener la misma carga que el átomo de carbono inicial, pero el número másico es ahora más elevado. Tenemos, pues, un isótopo del núcleo inicial. Si este isótopo del carbono recibe otro protón, forma de nuevo nitrógeno. Pero éste tiene ahora el número másico 14, o sea, es  $N^{14}$ . Si se une un protón más al nuevo átomo de nitrógeno, se transformará en  $O^{15}$ , es decir, en oxígeno de número másico 15. Este núcleo también es radiactivo, y emitirá un positrón y un neutrino, transformándose en  $N^{15}$ . Es decir, en nitrógeno de número másico 15. Si recordamos que el proceso empezó con un carbono de número másico 12 y que ahora tenemos un nitrógeno de número másico 15, comprobaremos que la acumulación sucesiva de átomos de hidrógeno ha hecho el átomo cada vez más pesado. Si se une ahora otro protón al átomo de nitrógeno, éste emitirá dos átomos de hidrógeno y dos neutrones, o sea, cuatro partículas que forman en conjunto un núcleo de helio, transformándose de nuevo nuestro núcleo en el antiguo núcleo de carbono. El ciclo se ha cerrado.

El proceso ha consumido en conjunto cuatro protones y ha formado un núcleo de helio: el hidrógeno se ha transformado pues en helio. Y este proceso libera una cantidad de energía suficiente para que las estrellas puedan brillar durante miles de millones de años. La materia estelar se calienta gracias a los procesos parciales del ciclo. En parte porque los cuantos de radiación producidos en las reacciones transmiten la energía al gas estelar, y en parte porque los positrones se unen rápidamente con los electrones del medio emitiendo más cuantos de radiación y calentando todavía más la materia estelar. Los neutrinos se llevan una pequeña parte de la energía.

Pero no solamente el hidrógeno se transforma en helio mediante el ciclo del carbono, sino que también lo hace mediante la cadena protón-protón

descubierta posteriormente. Hans Bethe y Charles Critchfield demostraron en el año 1938 que se puede prescindir del carbono, el oxígeno y el nitrógeno. En la figura 2 se ilustra el proceso.



**FIGURA 2**

En la parte superior de la figura 2, dos protones chocan y se fusionan. Emiten un positrón y un neutrino. El núcleo restante consiste ahora únicamente de un protón y un neutrón. Este núcleo tiene la misma carga que el hidrógeno, pero su masa es doble; es el hidrógeno pesado o deuterio. Si el núcleo de hidrógeno choca con un núcleo de deuterio, los dos núcleos se unen formando un átomo de helio, consistente en dos protones y un neutrón. Este helio es el isótopo ligero  $He^3$ , su número atómico es el del helio, pero su número másico es menor que el del helio corriente. Si ahora chocan dos núcleos de helio ligero producidos por el proceso anterior se fusionarán formando un núcleo corriente de helio y liberando al mismo tiempo dos núcleos de hidrógeno. En esta cadena, cuatro núcleos de hidrógeno han formado un núcleo de helio. Cuál de los dos procesos actúa en las estrellas, la cadena protón - protón o el ciclo del carbono?. Si la temperatura es suficiente alta pueden darse ambos procesos en las estrellas. Cuando la temperatura es de 10 millones de grados, predominan los procesos de la cadena protón - protón. Si la temperatura es mucho más alta, predomina la producción de energía a través del ciclo del carbono.



Cuando los núcleos atómicos de un gramo de hidrógeno se fusionan y se transforman en átomos de helio, este gramo de materia libera 630.000 millones de julios, es decir, una energía 20 millones de veces superior a la obtenida quemando la misma cantidad de carbón. Por lo tanto, la energía nuclear del sol dura también 20 millones de veces más, y la duración del sol se sitúa en los 100.000 millones de años. Por fin hemos descubierto una fuente de energía que cubre las necesidades de radiación del sol durante miles de millones de años. Luego la reserva de energía almacenada en el sol en forma de hidrógeno alcanza para 100.000 millones de años.

Teniendo en cuenta que el sol contiene únicamente un 70% de hidrógeno y que el agotamiento de la energía nuclear de una estrella empieza a notarse cuanto ha gastado del 10 al 20% de su hidrógeno, los cálculos muestran que el periodo de vida del sol es de unos 7.000 millones de años, lo bastante largo sin embargo para que el sol haya podido irradiar de modo uniforme la tierra durante todo el tiempo en que ha existido vida sobre este planeta.

### Bibliografía

1. OSTER, Ludwig. Astronomía Moderna. Editorial Reverté S. A. España 1984.
2. COMAS, Solá José. Astronomía. Editorial Ramón Sopena S. A. Barcelona. 1976.
3. CUNINGHAME, J. B. Introducción al núcleo atómico. Editorial Alhambra S. A. 1980.
4. EISBERG, Robert M. Fundamentos de Física Moderna. Editorial Limusa. 1986.
5. RESNICH, Robert. Eisberg Robert. Física Cuántica. Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas. Editorial Limusa. 1986.
6. ACOSTA, Virgilio et al. Curso de Física Moderna. Editorial Haria. 1980.
7. CERNUSHI, Félix, Codina Sayd. Panorama de la astronomía moderna. Serie de física. Monografía 2. Departamento de Asuntos Científicos O. E. A. 1976.
8. JASCHEK, Carlos, Corvalán Mercedes. Astrofísica. Serie de Física. Monografía 10. Departamento de Asuntos Científicos O. E. A. 1975.
9. MEJIA, Gastón, Aguirre Carlos. La radiación cósmica. Serie de Física. Monografía 9. Departamento de Asuntos Científicos O. E. A. 1974.
10. BURCHAM, W. E. Física Nuclear. Editorial Reverté S. A. Barcelona. 1990.
11. SERGRE, Emilio. Núcleos y partículas. Editorial Reverté S. A. Barcelona. 1990.